

# ***OPTIMIZACIÓN DE LA REGLA MENSUAL DE OPERACIÓN DEL EMBALSE DE SALVAJINA***



## **RESUMEN**

**María Clemencia Sandoval García, M.Sc.**  
Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca,  
CVC, Cali – Colombia

**Carlos A. Ramírez Callejas, M.Sc.**  
Profesor Titular  
Facultad de Ingeniería – EIDENAR  
Universidad del Valle, Cali – Colombia  
[caramir@univalle.edu.co](mailto:caramir@univalle.edu.co)

**Santiago Santacruz Salazar, Ing.**  
Facultad de Ingeniería – EIDENAR  
Universidad del Valle, Cali – Colombia  
[santsasa@gmail.com](mailto:santsasa@gmail.com)

El presente estudio fue planteado para revisar y optimizar la regla de operación mensual del embalse multipropósito de Salvajina (Colombia), veinte años después de haberse iniciado su operación. Con este propósito se diseñó un modelo de programación dinámica para maximizar los beneficios por la generación de energía eléctrica teniendo como restricciones la regulación de las crecientes en invierno y el alivio de la contaminación durante el verano. Para la optimización de la regla de operación se determinaron los niveles y volúmenes de reserva y espera requeridos para el control de las avenidas en el río Cauca y para proveer un caudal efluente mínimo que permita garantizar un caudal diario en la estación Juanchito del río Cauca (localizada 141 km aguas abajo de la represa, y sitio de captación de la planta del acueducto de Cali) el 90% del tiempo durante los períodos de verano más críticos.

*\* Recibido : Julio 14 2007 \* Aceptado : Septiembre 3 2007*

## PALABRAS CLAVES

Optimización, Programación dinámica, Operación de embalse

## ABSTRACT

*In the present study a model was designed for the optimization of the rule for monthly operation of the Salvajina dam (Colombia) based in the technology of dynamic programming. The model maximizes the benefits for electric power generation, ensuring at the same time flood regulation in winter and pollution relief during the summer. For the optimization of the rule of operation, it was necessary to define the levels and volumes of reserve and holding required for the control of flood zones in the Cauca river and to provide an effluent minimal flow and assure a daily flow at the Juanchito station (located 141 km downstream from the dam) of the Cauca river, 90 % of the time during the most critical summer periods.*

## KEYWORDS

Optimization, dynamic programming, dam operation

## 1. INTRODUCCIÓN

El embalse multipropósito de Salvajina, ubicado en el municipio de Suárez, departamento del Cauca (Colombia), hace parte del Proyecto de Regulación del río Cauca cuyo objetivo fundamental es la adecuación de las zonas planas de su alto valle geográfico para la explotación agrícola y la protección de zonas inundables. Además de amortiguar las crecientes del río, el embalse cuenta con una capacidad instalada de generación de energía eléctrica de 270 MW y la disponibilidad de reservas de agua para aumentar la capacidad de dilución del río durante el verano para alivio de la contaminación de sus aguas.

Transcurridos más de 20 años desde el inicio de su operación, las necesidades de agua y la demanda de energía eléctrica, al igual que las condiciones

hidrológicas, hidráulicas y de la calidad del agua del río han cambiado, por lo cual es pertinente ajustar y actualizar la regla mensual de operación del embalse, y a partir del análisis de la información histórica de 20 años de operación una estrategia óptima que permitiese regular los caudales máximos y mínimos para el control de inundaciones y de la contaminación del agua, respectivamente, y simultáneamente maximizar los beneficios percibidos por la generación de energía eléctrica.

Como punto de partida para la actualización y optimización de la operación mensual del embalse se redefinieron los niveles y los volúmenes de espera y de reserva mensuales con el fin de regular las crecientes en invierno y aliviar la contaminación del río durante los veranos intensos. Luego, se elaboró un modelo computacional con base en la técnica de programación dinámica para determinar la estrategia de operación óptima cumpliendo determinadas restricciones sobre los niveles y los volúmenes de reserva y espera, los caudales efluentes desde el embalse, los caudales máximo y mínimo admisibles en la estación Juanchito y las condiciones inicial y final del embalse.

La aplicación del modelo de optimización permitió establecer las estrategias óptimas de operación anuales para el periodo 1946 – 2006, es decir, se determinaron los caudales efluentes medios y los volúmenes de agua óptimos en el embalse al final de cada mes, restringiendo el nivel del agua almacenada al inicio y al final de cada año hidrológico en el nivel mínimo técnico.

Estos resultados, junto con los niveles y los volúmenes de espera y reserva, sirvieron para establecer las envolventes mínima y máxima de las operaciones óptimas.

Debido a la variabilidad del régimen de caudales en el río y a la variación en las necesidades de energía eléctrica a generar, los niveles en el embalse pueden fluctuar en el rango definidos por estas envolventes.

Dichos rangos mensuales se subdividen en tres subrangos, y con base en ellos se aplicó nuevamente el modelo de optimización para finalmente establecer los rangos de niveles y de volúmenes al final de cada mes (objetivos mensuales), los cuales fueron clasificados de acuerdo con el caudal afluente del mes antecedente y la condición del embalse al inicio de cada mes, y constituyen la Regla Mensual de Operación del embalse.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Variables relacionadas con la operación de una central hidroeléctrica

El Consejo Nacional de Operación, ente gubernamental encargado de regular la actividad de las empresas e instituciones encargadas de la operación de los embalses en Colombia, ha definido algunos niveles y volúmenes característicos de cada embalse, los cuales sirvieron de referencia para el análisis que se presenta.

En particular, se han adoptado los siguientes conceptos definidos en el Acuerdo No. 153 de 2001 (CNO, 2001):

. **Nivel de espera:** Elevación de la superficie de agua en el embalse definida para la regulación de la creciente

. **Volumen de espera:** Volumen definido entre el nivel máximo físico y el nivel de espera.

. **Nivel mínimo técnico:** Es la elevación de la superficie del agua en el embalse hasta la cual puede utilizarse su agua cumpliendo con condiciones de seguridad en las estructuras hidráulicas y en las instalaciones de generación para plena carga de todas las unidades

. **Nivel máximo físico:** Elevación máxima de la superficie del agua del embalse definida por la cota de la cresta del vertedero, o la cota superior de compuertas, o debajo de ésta si existe alguna restricción en la estructura hidráulica.

Asimismo, se definieron tres variables fundamentales en este estudio como son:

. **Cargo por capacidad:** Cobro a los consumidores con el fin de remunerar a los generadores que aportarían energía para satisfacer la demanda durante la estación de verano en el caso en que ocurriese una hidrología con aporte energético críticamente bajo la cual requeriría la utilización de todos los recursos energéticos disponibles (Durán, H., 2003).

. **Nivel de reserva:** Es la mínima elevación de la superficie de agua en el embalse requerida para atender la demanda de agua durante los periodos de verano críticos (PMC, 2007c).

. **Volumen de reserva:** Volumen de agua requerido en el embalse para alcanzar el nivel de reserva.

### 2.2 Determinación de los niveles y los volúmenes de reserva

Con el fin de garantizar un caudal diario mínimo durante periodos críticos de verano en la estación hidrométrica Juanchito (localizada 141 km aguas abajo de la represa), se determinó el volumen mínimo de agua requerido en el embalse al inicio de cada mes para complementar los aporte de los ríos tributarios entre Salvajina y dicha estación.

En primer lugar, para los periodos de bajas precipitaciones en la cuenca (enero – marzo) y (julio – octubre) entre los años 1946 y 2006, se calculó el déficit mensual de agua o volumen adicional de agua requerido en el

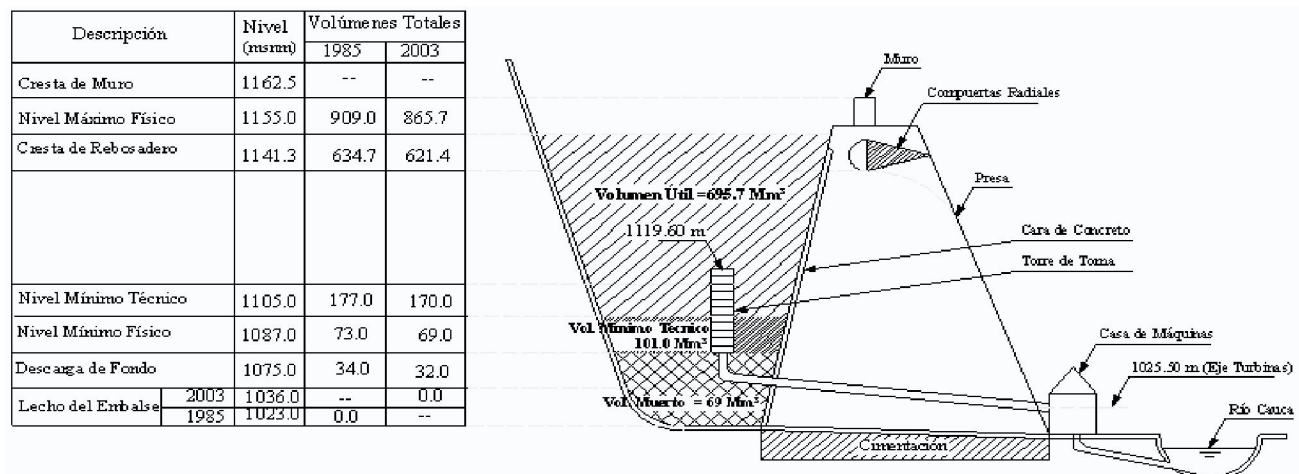


Figura 1 Niveles y volúmenes característicos del embalse de Salvajina Batimetrías de los años 1985 y 2003

embalse para garantizar un caudal mínimo en Juanchito como la diferencia entre el caudal mensual mínimo admisible,  $Q_{JMIN}$ , y el caudal no regulado en dicha estación,  $Q_{JNR}$  (i.e., aquél que se hubiese registrado si no existiese la represa).

Para el periodo 1985 - 2006 (Post-Salvajina) se consideró el caudal no regulado en Juanchito,  $Q_{JNR}$ , como la suma del caudal afluente al embalse,  $Q_a$ , y el aporte al río Cauca de la cuenca aferente entre Salvajina y Juanchito,  $Q_i$ . Matemáticamente esto se expresa como:

$$Q_{JNR} = Q_t + Q_a$$

$$Q_{JNR} = (Q_j - Q_e) + Q_a$$

el déficit mensual de agua se calculó por medio de la expresión:

$$V_d = (Q_{Jmin} - Q_{JNR}) \cdot T$$

donde  $V_d$  es el déficit de volumen de agua o volumen adicional de agua requerido para garantizar el caudal mínimo en Juanchito ( $Mm^3$ );  $Q_j$  es el caudal medio diario en Juanchito ( $m^3/s$ );  $Q_{Jmin}$  es el caudal diario mínimo en Juanchito ( $m^3/s$ );  $Q_{JNR}$  es el caudal medio diario no regulado en Juanchito ( $m^3/s$ ); y,  $T$  es el periodo de un mes (s).

Con base en estos volúmenes mensuales se calcularon los volúmenes semestrales adicionales requeridos (enero

– junio y julio – diciembre) y a partir de éstos se determinaron las curvas de permanencia de los volúmenes de reserva semestrales, es decir, los volúmenes requeridos en el embalse para garantizar un caudal diario mínimo en la estación Juanchito durante cada semestre. Inicialmente se consideraron los volúmenes de reserva correspondientes a los percentiles 0, 5 y 10 de la serie de volúmenes acumulados, los cuales se distribuyeron ponderadamente entre los meses de menores precipitaciones (enero - marzo y julio - octubre), teniendo en cuenta su participación porcentual media en el volumen de reserva semestral acumulado entre 1946 y 2006.

El análisis anterior se efectuó considerando diferentes caudales diarios mínimos admisibles en Juanchito (130, 140, 150 y 170  $m^3/s$ ). Finalmente se adoptó como volumen de reserva de cada mes, aquél que garantiza un caudal diario mínimo de 140  $m^3/s$  en Juanchito el 95% del tiempo (Figura 1).

Estos valores fueron seleccionados considerando, en primer lugar, las recomendaciones para la regulación de caudales del río Cauca desde el embalse de Salvajina en relación con el caudal ecológico, la calidad del agua para consumo humano y el alivio de la contaminación presentadas en el informe Análisis de la Incidencia del embalse de Salvajina (CVC-Universidad del Valle, 2007b); y, en

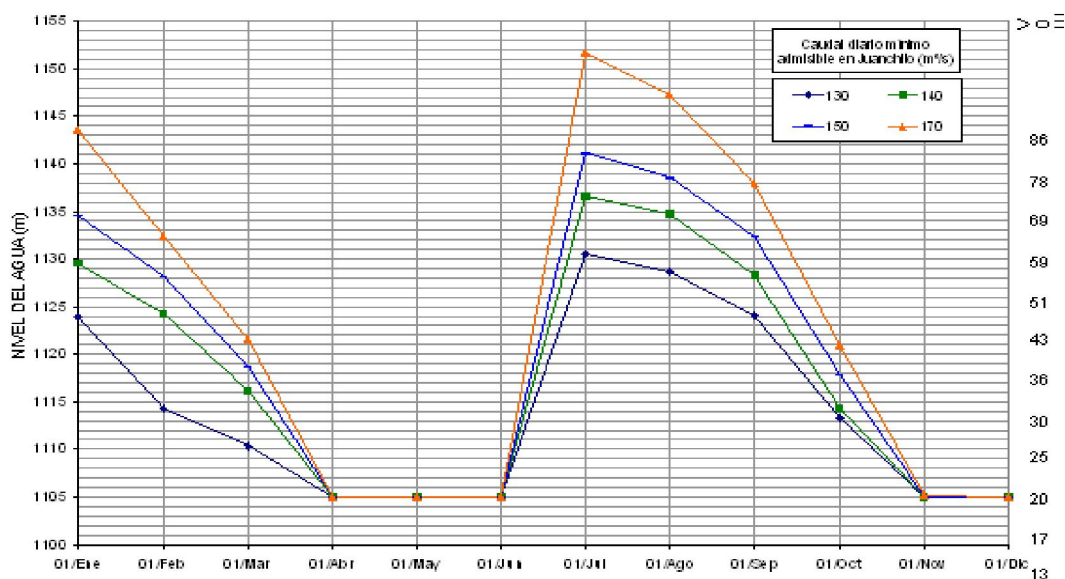


Figura 2 Niveles y volúmenes de reserva evaluados para garantizar el 95% del tiempo un caudal diario mínimo en Juanchito para alivio de la contaminación



requerido al inicio del verano. Tal como se ilustra en la Figura 2, para garantizar caudales diarios mínimos en Juanchito de 150 y 170 m<sup>3</sup>/s se requieren unos volúmenes muy altos, cerca del 71% y 95%, respectivamente, del volumen útil del embalse al inicio del mes de junio. Durante los meses de invierno (abril, mayo, junio, noviembre y diciembre) los volúmenes de agua adicionales requeridos para garantizar un caudal diario mínimo en Juanchito son nulos porque el aporte de los ríos tributarios aguas abajo del embalse es suficiente para ello. Por esta razón, el volumen mínimo requerido en el embalse durante estos meses es igual al mínimo técnico (nivel 1105 m, volumen 170 Mm<sup>3</sup>).

### 2.3 Determinación de los niveles y los volúmenes de espera

Para cada mes se debe establecer el nivel de espera, es decir, el máximo nivel del agua admisible en el embalse con el objeto de garantizar un volumen libre o de espera suficiente para amortiguar las crecientes del río y reducir la magnitud y la frecuencia de los desbordamientos del río Cauca aguas abajo de Salvajina. Para ello, inicialmente se calcularon los volúmenes de agua en exceso diarios que deberían almacenarse en el embalse en el periodo 1946–2006, como la diferencia entre el volumen afluente al embalse y el volumen efluente diario.

Debido a que en periodos de invierno el aporte de los tributarios se incrementa junto con el riesgo de desbordamiento del río Cauca en Juanchito, el caudal efluente diario que se puede liberar durante la regulación de crecientes sumado al aporte de los tributarios no debe sobrepasar la capacidad del cauce en la estación Juanchito; y en segundo lugar, el caudal efluente diario no debe ser mayor que un máximo admisible, esto con el objeto de maximizar la eficiencia de la generación hidroeléctrica.

Los volúmenes de exceso diarios así calculados se acumularon para determinar el volumen de exceso asociado a cada creciente del río y para cada mes del año. Con cada uno de esos eventos registrados se construyeron series de volúmenes de exceso mensuales para el periodo 1946 - 2006, con las cuales se elaboraron las respectivas curvas de duración que permitieron definir el volumen de espera mensual.

Con el fin de definir las condiciones más adecuadas desde el punto de vista operativo del embalse se evalua-

ron diferentes caudales efluentes diarios máximos a liberar desde Salvajina, y dos opciones para el caudal diario máximo admisible en Juanchito. Esta última condición se verificó en el modelo considerando un tiempo medio de tránsito entre el embalse y la estación Juanchito de un día. De esta manera el caudal registrado en Juanchito en el día  $i$  puede descomponerse en el aporte de tributarios en el tramo Salvajina–Juanchito del día  $i$  y el caudal efluente de Salvajina del día anterior  $i-1$ , de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Q_j(i) = Q_e(i-1) + Q_t(i)$$

donde  $Q_j(i)$  es el caudal medio diario en la estación Juanchito el día  $i$ ;  $Q_e(i-1)$  es el caudal efluente medio diario de Salvajina del día  $i-1$ ;  $Q_t(i)$  es el caudal aportado por la cuenca aferente entre la represa de Salvajina y Juanchito en el día  $i$ .

Con base en la experiencia adquirida por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC, y la Empresa de Energía del Pacífico, EPSA, tras un poco más de 20 años de operación del embalse y los resultados del análisis expuesto, finalmente se adoptó de la curva de permanencia de volúmenes de espera mensuales aquel que garantiza en la estación Juanchito caudales inferiores a 900 m<sup>3</sup>/s durante el 95% del tiempo, con un caudal efluente diario máximo de 225 m<sup>3</sup>/s.

Una vez determinado el volumen de espera mensual, se calculó el volumen máximo admisible en el embalse al inicio de cada mes (para la regulación de crecientes) como la diferencia entre el volumen total (máximo físico) del embalse y el volumen de espera del mes correspondiente. El nivel de espera se obtuvo de la relación Nivel – Volumen del embalse de Salvajina según la batimetría del año 2003. De esta manera, el nivel de espera indica el nivel de agua máximo recomendable en el embalse para garantizar un volumen de espera suficiente para almacenar los excesos de crecientes que pueden presentarse en cada mes. En la Figura 4 se presentan los nuevos niveles y volúmenes de espera y reserva adoptados para el embalse de Salvajina.

### 2.4 Diseño de un modelo computacional para la optimización de la regla de operación

#### 2.4.1 Programación dinámica para el embalse de Salvajina

La necesidad de regular los caudales en el río Cauca con fines de control de inundaciones y de la contaminación

y con estas restricciones maximizar los beneficios percibidos por la generación de energía eléctrica es un problema de optimización que puede ser resuelto con base en la técnica de programación dinámica. Esta técnica es un planteamiento matemático que permite determinar el conjunto de decisiones que dan lugar a la solución óptima de un proceso secuencial y no debe confundirse con un algoritmo que soluciona el problema a partir de una función definida (Bogardi, 1992; López, 1971). La programación dinámica exige la definición de restricciones claras dentro de las cuales se debe efectuar la operación del embalse y para las cuales se deben especificar instrucciones a seguir en caso que se infrinjan, así como un criterio de evaluación de las alternativas de operación para seleccionar la más conveniente. En este caso el criterio fue el mayor beneficio económico acumulado al finalizar el año hidrológico (noviembre a octubre).

Para aplicar la programación dinámica a la operación mensual del embalse de Salvajina se desarrolló un modelo computacional, el cual evalúa todas las alternativas posibles de operación de cada mes por medio de un balance hídrico (en el cual se considera al embalse como el volumen de control), y calcula el beneficio acumulado al final del año por concepto de generación de energía eléctrica garantizando en todo momento el cumplimiento de las restricciones para la regulación de crecientes y el alivio de la contaminación. Finalmente, el modelo compara todas las alternativas evaluadas y selecciona la que arroja los mayores beneficios.

Para el modelo se dividió el volumen útil del embalse en 101 estados o volúmenes posibles entre 170 y 865.7 Mm<sup>3</sup>, con una diferencia de 6.96 Mm<sup>3</sup> entre franjas o volúmenes consecutivos. En cada mes,  $i$ , se calcula el caudal efluente por medio de un balance hídrico respetando la restricción de variación mensual máxima permisible del volumen de agua en el embalse y las demás restricciones ambientales (ver ítem 2.4.3). Luego se determina la potencia generada y el beneficio percibido de acuerdo con las tarifas medias mensuales preestablecidas. En el siguiente mes evaluado,  $i + 1$ , (el cual cronológicamente corresponde al mes anterior) el volumen final corresponde al volumen inicial del mes  $i$ ; los beneficios calculados (los cuales han sido acumulados desde el mes 1 hasta el mes  $i$ ) para las combinaciones con un determinado volumen inicial en el mes  $i$  se suman a los beneficios percibidos en el mes  $i + 1$ , de las alternativas evaluadas cuyo estado final coincide con el estado inicial del embalse en el periodo  $i$ . De esta

manera cuando  $i = 12$  se habrán calculado múltiples beneficios acumulados en un año; finalmente se determina el mayor de los beneficio acumulados ellos y se reconstruye la estrategia de operación correspondiente, determinando el estado del embalse y el caudal efluente óptimo en cada mes. Matemáticamente la regla computacional para la optimización se puede resumir con la denominada ecuación regresiva:

$$\max_{x_n} f^*_i(s) = \max_{x_n} \{C_{s,x_n} + f^*_{i-1}(x_i)\}$$

donde  $C_{s,x_n}$  es la contribución de la decisión  $x_n$  dado el estado  $s$  del embalse;  $i$  es el mes de análisis;  $s_i$  es el estado del embalse al inicio del mes  $i$ ;  $f^*_{i-1}(s)$  es el subóptimo beneficio encontrado para el mes de análisis dado que se tomó la decisión  $x_i$  en el estado  $s$  del embalse.

A lo largo de todo el proceso de cálculo descrito se chequea que las restricciones de operación impuestas no sean violadas. Cuando esto sucede se descarta dicha combinación de estados (condición inicial y final del mes  $i$ ) y se repite el procedimiento con la siguiente combinación de estados inicial y final del embalse en el mes evaluado.

En la Figura 3 se presenta el flujograma general del modelo computacional para determinar la estrategia óptima de operación del embalse.

#### 2.4.2 Cálculo de beneficios percibidos mensualmente por la generación de energía eléctrica

##### Tarifas

Se determinaron los precios de bolsa medios mensuales de julio de 1995 a diciembre de 2006 a partir de la serie diaria. Con la misma serie mensual se calcularon los valores medios mensuales históricos, empleados en la optimización de los años 1946 a 1994.

Para efectos de cálculo de beneficios todas las tarifas fueron llevadas a valor presente de diciembre de 2006, con base en el índice de precios al consumidor del Departamento Administrativo Nacional de Estadística, DANE.

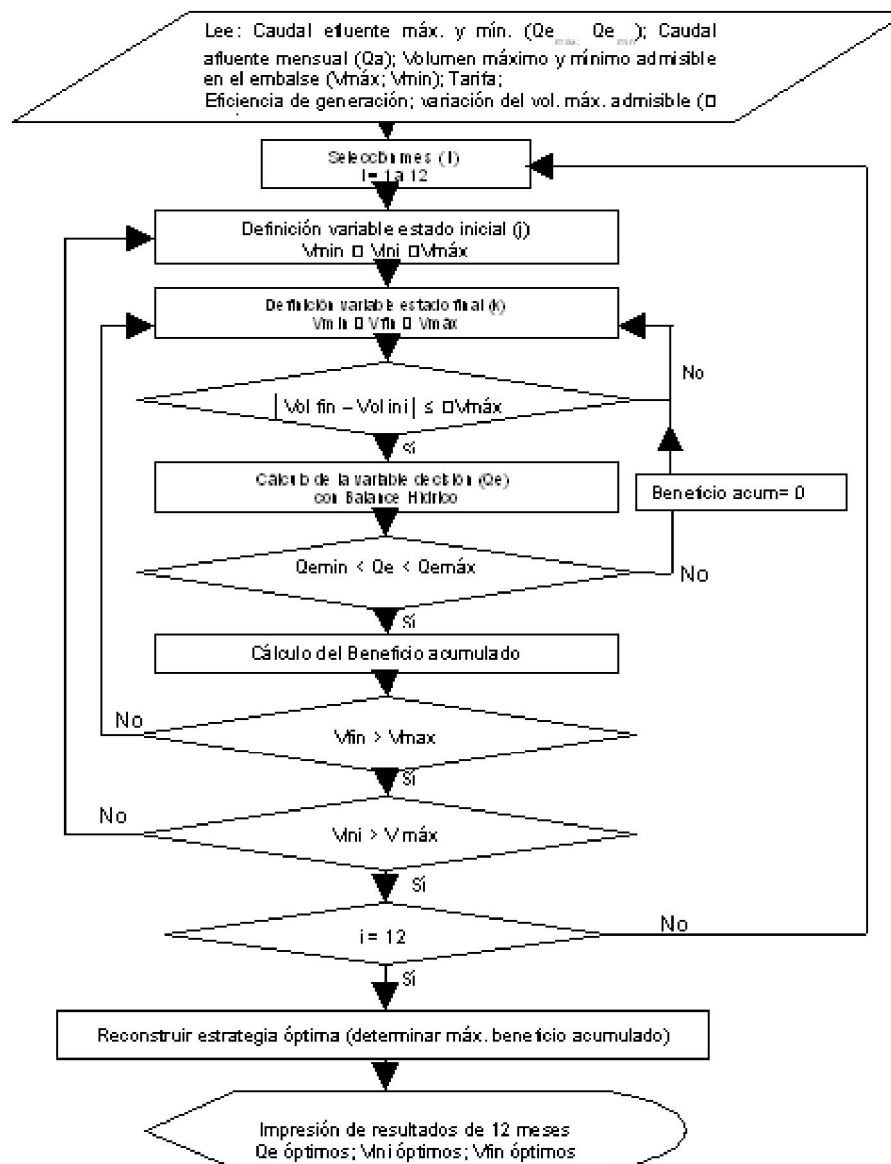


Figura 3 Flujograma general del modelo computacional diseñado para la optimización de la operación del embalse de Salvajina

### 3.1. Eficiencia de las turbinas

Debido a las pérdidas de energía en el proceso de conversión de energía es importante considerar la eficiencia de generación de las turbinas en función del tipo de turbina, la cabeza de energía disponible en el embalse y el caudal turbinado. Con base en las Pruebas en Campo de Rendimientos de Turbinas de la Central Hidroeléctrica Salvajina "Index Test" del año 1989, EPSA

determinó la relación Eficiencia vs. Carga; con ésta se definió en este estudio la relación Eficiencia vs. Potencia Bruta del embalse de Salvajina empleada, la cual permite calcular la potencia bruta generada por una turbina, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$P_{bu} = (P_a / h) \cdot 100$$

donde  $P_{bu}$  es la potencia bruta generada por una turbina (MW);  $P_a$  es la potencia activa o neta generada por

una turbina (MW);  $h$  es la eficiencia de la turbina (%)

El producto de la tarifa mensual por la potencia activa,  $P_a$ , representa el beneficio percibido por la generación de energía eléctrica. A continuación se resume el procedimiento de cálculo establecido en el modelo computacional:

1. Se determina el caudal efluente ( $Q_e$ ) por medio de un balance hídrico
2. Se calcula el nivel medio ( $h$ ) entre el estado inicial y final del embalse en el periodo evaluado con base en la relación Nivel–Volumen de la batimetría del año 2003
3. Se determina el factor de conversión,  $FC$ , como una función del nivel medio de la superficie de agua,  $FC = f(h)$  (EPSA - INGETEC, 2000)
4. Se calcula la potencia bruta generada,  $P_b$ , y el número de turbinas requerido,  $N$

$$P_b = FC \cdot Q_e$$

5. Se divide  $P_b$  entre el número de turbinas,  $N$ , para determinar la potencia bruta promedio generada por una turbina,  $P_{bu}$
6. Se calcula la potencia activa total generada como el producto de  $P_{bu}$ , la eficiencia ( $h$ ) y el número de turbinas en operación ( $N$ )

$$P_a = h \times P_{bu} \times N$$

7. El beneficio mensual por generación de energía eléctrica es el producto entre la potencia activa generada y la tarifa mensual

$$Ben = P_a \times Tarifa$$

donde  $FC$  es el Factor de Conversión (MW/m<sup>3</sup>/s) que representa la relación entre la potencia eléctrica generada neta y la unidad de caudal necesaria para generar esa potencia, para una cabeza hidráulica determinada (CNO, 2000);  $h$  es el nivel medio del agua entre los estados inicial y final (m);  $Q_e$  es el caudal efluente (m<sup>3</sup>/s);  $N$  es el número de turbinas que generan energía eléctrica;  $P_a$  es la potencia activa total generada por el sistema (MW);  $P_b$  es la potencia bruta total generada por el sistema (MW);  $P_{bu}$  es la potencia bruta generada por cada una de las  $N$  turbinas (MW);  $h$  es la eficiencia de generación (MW/MW);  $Tarifa$  es el precio de la energía generada (\$/MW);  $Ben$  es el beneficio económico (\$).

## 2.4.1 Restricciones para la operación óptima

Además de los niveles y volúmenes de espera y reserva que deben respetarse al inicio de cada mes para establecer la estrategia óptima de operación del embalse de Salvajina fue necesario especificar las restricciones que se resumen a continuación.

### . Condición inicial y final del embalse

Con el fin de disponer de la mayor parte del volumen útil del embalse al inicio del periodo invernal y así poder almacenar los volúmenes de agua requeridos para regular las crecientes, se adoptó como condiciones inicial y final del año hidrológico un nivel del embalse de 1110 m, ligeramente superior al nivel mínimo técnico (1105 m). Esta restricción igualmente permite el aprovechamiento del volumen útil del embalse para proveer durante el periodo crítico de verano (julio – octubre) los caudales suficientes aguas abajo del embalse para garantizar el caudal diario mínimo en Juanchito.  
Caudal efluente mínimo mensual

El caudal efluente mínimo mensual del embalse es el mayor entre los dos siguientes: (i) el caudal requerido para garantizar la operación normal de las turbinas sin que se produzcan vibraciones ( $\geq 60$  m<sup>3</sup>/s) y (ii) el caudal requerido para complementar el aporte de tributarios aguas abajo del embalse de modo que se garantice para el río Cauca un caudal de 140 m<sup>3</sup>/s en la estación Juanchito para el alivio de la contaminación.

Para determinar los caudales efluentes mínimos mensuales requeridos para el alivio de la contaminación en Juanchito, inicialmente, se construyeron las curvas de duración de caudales diarios con base en los caudales diarios de las estaciones Juanchito ( $Q_j$ ), Efluente ( $Q_e$ ) y Salvajina (o afluente) ( $Q_a$ ). El aporte medio diario de los tributarios a Juanchito en el sector Salvajina– Juanchito ( $Q_i$ ) se calculó como:

$$Q_i(i) = Q_j(i) - Q_a(i-1) \quad (\text{Pre-Salvajina: 1946 – 1985})$$

$$Q_i(i) = Q_j(i) - Q_e(i-1) \quad (\text{Post-Salvajina: 1986 – 2006})$$

Donde  $Q_i$  es el aporte a Juanchito de tributarios aguas abajo del embalse (m<sup>3</sup>/s);  $Q_j$  es el caudal medio diario en la estación Juanchito (m<sup>3</sup>/s);  $Q_a$  es el caudal afluente medio diario en la estación Salvajina (m<sup>3</sup>/s);  $Q_e$  es el caudal efluente medio diario en la estación efluente (m<sup>3</sup>/s);  $i$  es el día de análisis.  
Luego, el caudal efluente diario mínimo requerido en el



día  $i$ , para alcanzar  $140 \text{ m}^3/\text{s}$  en Juanchito debe ser:

$$Q_{\text{emin}}(i) = 140 - Q_t(i + 1) \quad 30$$

El caudal efluente mensual mínimo para garantizar  $140 \text{ m}^3/\text{s}$  en la estación Juanchito es el promedio de los valores diarios para cada mes en el periodo 1946–2006 considerando los aportes realizados por los tributarios aguas abajo de embalse.

Con los caudales efluentes mínimos mensuales se construyeron las curvas de permanencia de cada mes. Éstas permitieron determinar los caudales efluentes mensuales que garantizan el caudal mínimo admisible en Juanchito ( $140 \text{ m}^3/\text{s}$ ) durante el 90% del tiempo. Los meses que requirieron los mayores caudales efluentes fueron agosto y septiembre. Puesto que el caudal mínimo en Juanchito en los meses mayo, junio y diciembre bien puede ser proporcionado por los ríos tributarios, en dichos meses el caudal efluente mínimo fue determinado por el caudal mínimo recomendado para la operación normal de las turbinas de generación de energía eléctrica instaladas en el embalse ( $\geq 60 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

#### *. Caudal efluente máximo*

El caudal efluente máximo bajo condiciones normales de operación está restringido por la capacidad máxima de las tres turbinas instaladas ( $Q_{\text{e max}} = 350 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Variación mensual máxima del volumen de agua en el embalse

Esta restricción se impone con el fin de reducir el efecto erosivo sobre los taludes del embalse debido a variaciones muy bruscas de los niveles de agua procesos de mojado y secado muy rápidos. La diferencia máxima admisible entre los volúmenes de agua almacenados al inicio y fin de cada mes ( $DV_{\text{max}}$ ) fue determinada con base en la información histórica de la operación del embalse (que incluye las variaciones mensuales en los niveles de agua y los volúmenes almacenados) y un análisis de sensibilidad de esta restricción en la optimización de la operación del embalse para el periodo 2000 - 2005.

Para evaluar la importancia de la variación máxima admisible del volumen de agua en el embalse se realizó un análisis de sensibilidad de la optimización al cambio en dicha variable realizando optimizaciones con variaciones de  $105$  a  $385 \text{ Mm}^3$  y para distintos escenarios: (i) todas las restricciones de optimización y (ii) sin consi-

derar el cargo por capacidad. Se encontró que, en general, en la medida en que se permita una mayor variación mensual, los procesos de inundación y secado se intensifican durante los meses próximos a noviembre porque se ha impuesto una restricción de nivel de agua mínimo al inicio de ese mes y el resto de meses se mantienen niveles altos para incrementar la capacidad de generación de energía eléctrica.

También se halló que la condición del nivel de reserva estrecha considerablemente los rangos de operación de cada mes, especialmente para las menores variaciones mensuales máximas evaluadas y, dado que en todo caso, el de reserva es parte del volumen útil, es un volumen de agua que puede utilizarse durante la operación del embalse mientras se garantice que sólo hasta el final de cada verano se agotará la totalidad del volumen de reserva.

El análisis de sensibilidad también permitió establecer que no es posible encontrar una solución que satisfaga todas las restricciones impuestas a la operación cuando la variación mensual máxima admisible es inferior a  $175 \text{ Mm}^3$ .

Un segundo criterio para determinar la variación máxima del volumen en el embalse se sustenta en las máximas diferencias históricas registradas de acuerdo con la curva de duración de las variaciones mensuales de los volúmenes de agua almacenados en el embalse. La máxima diferencia mensual observada fue  $412 \text{ Mm}^3$  (aproximadamente  $27 \text{ m}$  de variación en el nivel del embalse) en noviembre de 1988, esto es el 59% del volumen útil del embalse, lo cual equivale a una variación diaria de  $13 \text{ Mm}^3$  ( $\approx 0.9 \text{ m}$ ).

Esta situación se considera excepcional pues sólo en el 10% de los registros se observan variaciones mensuales mayores o iguales a  $195 \text{ Mm}^3$  ( $\approx 11 \text{ m}$ ). Este último valor equivale a una variación diaria del volumen de  $6.5 \text{ Mm}^3$  ( $\approx 0.37 \text{ m}$ ), lo cual se considera razonable de acuerdo con la experiencia en el manejo del embalse. A partir de este análisis se estableció una variación máxima mensual admisible de  $210 \text{ Mm}^3$ .

. Generación mínima de energía eléctrica por el cargo por capacidad

Como todos los operadores de centrales hidroeléctricas que hacen parte del Sistema de Interconexión Nacional (SIN), EPSA recibe un cargo por capacidad de generación eléctrica; este cargo se cobra a los consumidores con el fin de remunerar a los generadores que aportarían

energía para satisfacer la demanda durante la estación de verano en el caso en que ocurriese una hidrología con aporte críticamente bajo y que requeriría la utilización de todos los recursos energéticos disponibles.

Según la información suministrada por EPSA, la energía que debe garantizar Salvajina al sistema es 44.8 GW-h por mes, equivalentes a 60 MW.

Optimización de la regla mensual de operación del embalse de Salvajina

Durante la primera fase del proceso de optimización de la regla de operación del embalse en el periodo 1946 – 2006 se determinó la envolvente de niveles óptimos del embalse; esto permitió estrechar los rangos de operación definidos inicialmente por los niveles de reserva y

espera (Figura 4).

En la práctica, no obstante, garantizar los niveles del embalse al final de cada mes según los niveles objetivos establecidos por el modelo de optimización resulta muy difícil debido a la alta variabilidad en el régimen de caudales del río Cauca y en la demanda de energía eléctrica.

Por esta razón, el rango de volúmenes del embalse definido por la envolvente de las optimizaciones anuales efectuadas inicialmente se dividió en tres sub-rangos para considerar situaciones en que estado del embalse al inicio de cualquier mes fuese alto, medio o bajo.

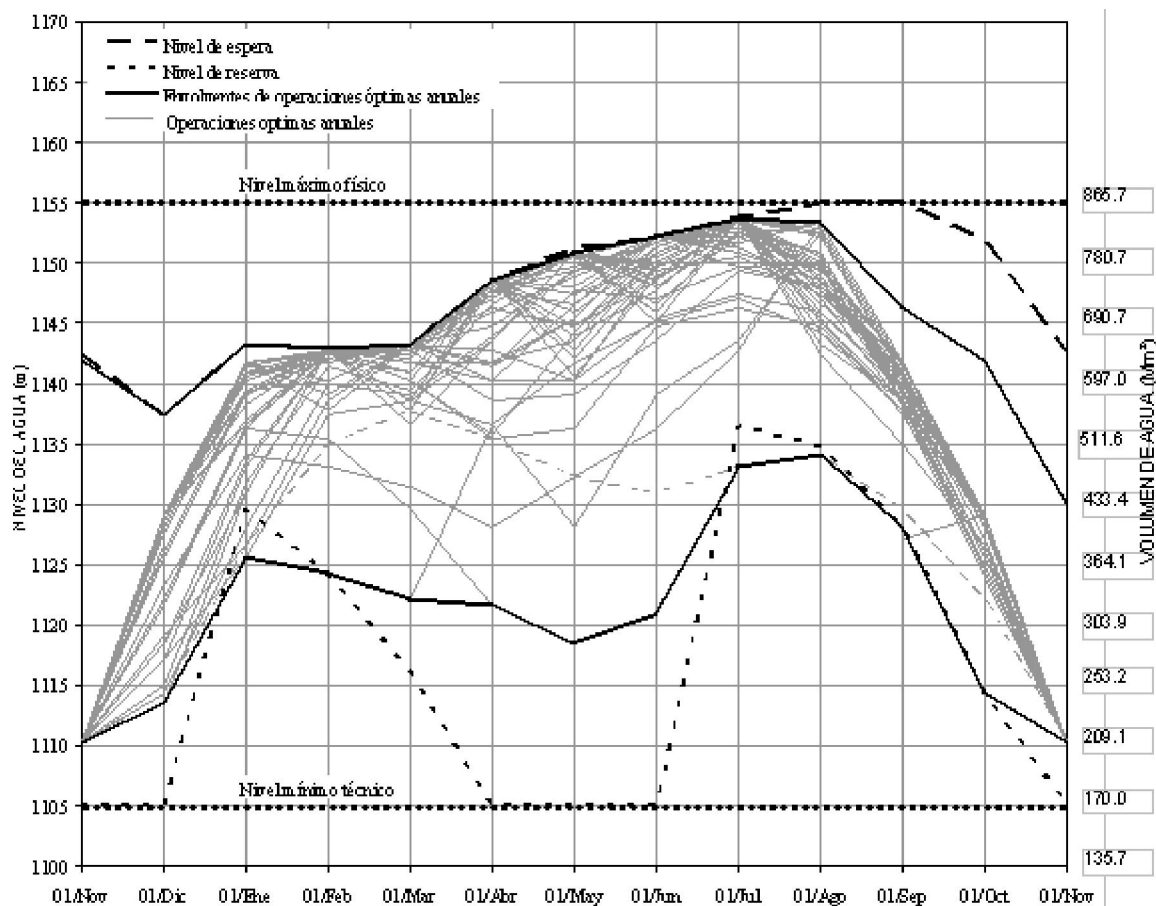


Figura 4 Niveles y volúmenes de espera y reserva y envolventes de las operaciones óptimas del embalse de Salvajina Periodo: 1946 - 2006

En la segunda fase de optimización se aplicó nuevamente el modelo computacional para todo el periodo 1946–2006, considerando en cada simulación cada uno de los sub-rangos mensuales definidos anteriormente. Los nuevos volúmenes objetivos mensuales fueron agrupados de acuerdo con los caudales afluentes del mes antecedente y la condición o estado inicial del embalse.

Los rangos de caudal afluente del mes antecedente para la clasificación de los volúmenes objetivos mensuales se seleccionaron a partir de las series históricas en el periodo 1946–2006 y considerando rangos aproximadamente iguales para cada mes.

Se excluyeron de la segunda fase de optimización aquellos años que por presentar una hidrología crítica – especialmente en verano– no cumplían todos los requerimientos para la optimización. Estos casos fueron considerados para la evaluación y ajuste de las operaciones de contingencia de invierno y verano, en las cuales se prioriza el cumplimiento durante la mayor parte del tiempo de los objetivos ambientales (control de crecientes y alivio de la contaminación del río Cauca). Estas operaciones de contingencia se detallan en el informe Evaluación y optimización de la regla mensual de operación del embalse de Salvajina (CVC – Universidad del Valle, 2007c).

Finalmente, para todas las combinaciones de las variables mes, condición inicial del embalse y caudal afluente medio del mes antecedente se construyeron las curvas de duración de los volúmenes finales óptimos y se adoptaron como máximo y mínimo los percentiles 0 y 90, respectivamente. Esto con el fin de descartar algunos resultados que se desviaban notablemente del conjunto

de optimizaciones y restaban funcionalidad a la regla de operación al definir rangos objetivos demasiado amplios.

Con base en la información presentada y las herramientas computacionales desarrolladas se definieron los rangos de niveles y de volúmenes finales u objetivos de cada mes para facilitar la programación mensual de la operación del embalse, reducir el riesgo de emergencias en veranos e inviernos excepcionales y maximizar los beneficios percibidos por la generación eléctrica. La nueva regla de operación considera, en su orden, (a) el mes de análisis; (b) la condición del embalse al inicio del mes (nivel de la superficie del agua en el embalse o volumen almacenado); y (c) el caudal afluente medio del mes antecedente. El Cuadro 1 ilustra, a manera de ejemplo, la regla de operación óptima para los meses de enero y febrero.

### 3. CONCLUSIONES

La regla de operación está concebida y es utilizada desde 1985 como un instrumento de planeación por el Comité técnico de Operación del embalse, -funcionarios de la CVC y EPSA-, quienes en los primeros días de cada mes establecen los objetivos de nivel y el volumen de agua a alcanzar al final del mes para maximizar los beneficios ambientales (regulación de crecientes del río Cauca y el alivio de la contaminación de sus aguas) y los beneficios económicos percibidos por generación eléctrica.

La actualización de la regla mensual de operación

	V. Inicial (Mm³)	Caudal afluente del mes antecedente (m³/s)	V. final (Mm³)	Nivel final (m)		Vol. Inicial (Mm³)	Caudal afluente del mes antecedente (m³/s)	V. final (Mm³)	Nivel final (m)
enero	657,0 - 559,6	>280	650 - 614	1142,8 - 1140,9	febrero	650 - 545,7	>250	657 - 617	1143,2 - 1141,0
		280-220	650 - 580	1142,8 - 1139,0			250-190	657 - 568	1143,2 - 1138,3
		220-160	650 - 587	1142,8 - 1139,4			190-130	657 - 546	1143,2 - 1137,0
		<160	650 - 580	1142,8 - 1139,0			<130	657 - 525	1143,2 - 1135,8
	559,6 - 462,2	>280	650 - 601	1142,8 - 1140,2		545,7 - 441,3	>250	657 - 598	1143,2 - 1140,0
		280-220	650 - 580	1142,8 - 1139,0			250-190	657 - 554	1143,2 - 1137,5
		220-160	650 - 560	1142,8 - 1137,8			190-130	657 - 446	1143,2 - 1130,8
		<160	650 - 504	1142,8 - 1134,5			<130	657 - 413	1143,2 - 1128,6
	462,2 - 371,8	>280	650 - 574	1142,8 - 1138,6		441,3 - 343,9	>250	657 - 542	1143,2 - 1136,8
		280-220	650 - 497	1142,8 - 1134,1			250-190	657 - 362	1143,2 - 1124,8
		220-160	650 - 464	1142,8 - 1131,9			190-130	657 - 420	1143,2 - 1129,1
		<160	650 - 462	1142,8 - 1131,8			<130	657 - 407	1143,2 - 1128,1

Cuadro 1 Regla mensual de operación óptima del embalse de Salvajina para los meses de enero y febrero

permitirá mayor confiabilidad en la definición de los niveles objetivo, dado que el análisis riguroso realizado y el modelo de optimización desarrollado incluyeron parámetros adicionales como el volumen al inicio del periodo y los rangos de variación del volumen, los cuales hacen parte de la nueva regla de operación mensual propuesta.

En el proceso de optimización de la regla se establecieron los niveles y los volúmenes de reserva suficientes para garantizar, durante veranos severos y prolongados, el cumplimiento del caudal mínimo en Juanchito para alivio de la contaminación ( $140 \text{ m}^3/\text{s}$ ) el 95% del tiempo. Asimismo, se establecieron los niveles y volúmenes de espera mensuales, que sólo pueden ser superados durante la regulación de las crecientes del río Cauca, con el fin de garantizar caudales diarios en Juanchito inferiores a  $900 \text{ m}^3/\text{s}$  durante el 95% del tiempo.

Los niveles y volúmenes objetivos mensuales del embalse, que definen la regla de operación, fueron calculados por medio de un modelo computacional diseñado para tal fin. El modelo se basa en la técnica de programación dinámica con el objetivo de simular la operación mensual del embalse garantizando la regulación del río Cauca (control de inundaciones y alivio de la contaminación) y maximizando los beneficios percibidos por la generación de energía eléctrica. Para ello, el modelo considera la condición del embalse al inicio del periodo, los caudales afluentes mensuales, el caudal efluente máximo admisible, los niveles y volúmenes de espera y reserva mensuales, la variación máxima admisible del volumen en el embalse, el cargo por capacidad, la eficiencia de las turbinas y las tarifas mensuales de energía.

#### 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bogardi, J. J. (1992). Notas de clase del curso Reservoirs: Classification, Theory, Planning, Aspects, p28–40. International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering. Delft, Holanda.
- Consejo Nacional de Operación - CNO (2001b). Acuerdo No. 153, julio 27 de 2001. Bogotá D.C., Colombia.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (1985). Normas de operación de la Central de Salvajina. Santiago de Cali, Colombia.
- \_\_\_\_\_. (1994). Proyecto de regulación del Río Cauca. Embalse de Salvajina. Información para operación. Santiago de Cali, Colombia.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – Universidad del Valle. (2007a). Estudio de los caudales afluentes y efluentes del embalse de Salvajina. Volumen V. Proyecto de Modelación del Río Cauca – PMC Fase III. Santiago de Cali, Colombia.
- \_\_\_\_\_. (2007b). Análisis de la incidencia del embalse de Salvajina sobre el río Cauca, tramo Salvajina - Mediacanoa. Volumen XV. Proyecto de Modelación del Río Cauca – PMC Fase III. Santiago de Cali, Colombia.
- \_\_\_\_\_. (2007c). Evaluación y optimización de la regla mensual de operación del embalse de Salvajina. Volumen XVI. Proyecto de Modelación del Río Cauca – PMC Fase III. Santiago de Cali, Colombia.